本科生实验报告

实验课程：操作系统原理实验

实验名称：并发与锁机制

专业名称：计算机科学与技术

学生姓名：张玉瑶

学生学号：23336316

实验地点：实验楼 B203

实验成绩：

报告时间：2025 年 5 月 5 日

Section 1 实验概述

- 实验任务 1：复现代码解决消失的芝士汉堡问题，并且结合自己所学的知识，实现并测试一个与本教程的实现方式不完全相同的锁机制。
- 实验任务 2：在本教程的代码环境下创建多个线程来模拟读者写者问题，需要使用读者优先的策略来实现同步，并通过一定的样例设计来体现写者的“饥饿”。
- 实验任务 3：

  1）在本教程的代码环境下，创建多个线程来模拟哲学家就餐的场景。结合信号量来实现理论课教材中给出的关于哲学家就餐问题的方法。

  2）演示死锁的场景并提出解决死锁的方法。

Section 2 实验步骤与实验结果

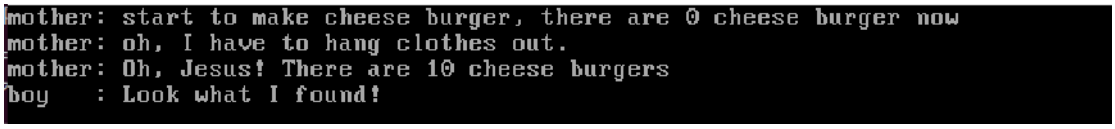
---------- **实验任务 1** ----------

- 任务要求：复现代码解决消失的芝士汉堡问题，并且结合自己所学的知识，实现并测试一个与本教程的实现方式不完全相同的锁机制。
- 思路分析：本实验通过自旋锁和信号量机制解决多线程并发访问共享资源（cheese_burger）导致的竞争问题。首先使用 xchg 指令实现原子交换的自旋锁（SpinLock），确保临界区互斥访问。随后引入信号量（Semaphore），通过P()/V()操作管理资源计数和线程阻塞/唤醒，采用MESA模型避免忙等待。为拓展锁机制，进一步利用 lock bts 指令实现自旋锁，通过原子位操作检测并设置锁状态。实验验证了两种锁均能有效防止数据竞争，信号量机制在资源紧张时通过阻塞队列优化CPU利用率。最终实现了线程安全的资源访问，并对比了不同锁实现的性能与适用场景。
- 实验步骤：

1.1 代码复现

//删除了从手册抄的实现过程。

iv）编译运行。

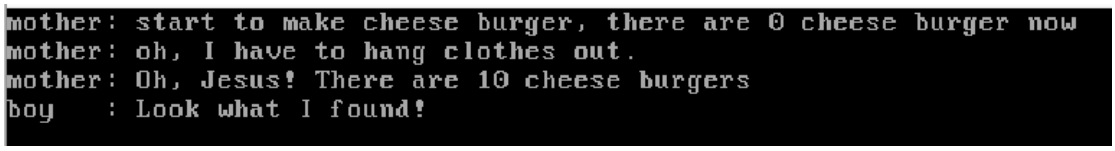


可以看到，a_mother 线程前后读取的 cheese_burger 的值和预期一致。说明我们成功地使用 SpinLock 来协调线程对共享变量的访问。

4）实现信号量。

//删除了从手册抄的实验过程。

iv）实现结果。



1.2 其他锁机制的实现：利用 lock 和 bts 来实现自旋锁。

bts 的作用是测试并设置指定的比特位置为 1，而 lock 可以保证这条指令是原子的。lock bts [mem], bit_index 指令中[mem]指向内存中的某个变量，bit_index 是要操作的位置索引，这条指令可以把 mem 中的变量的该索引位置置为 1。

```
; void asm_atomic_exchange(uint32_t *register, uint32_t *memory)
global asm_atomic_exchange
asm_atomic_exchange:
    push ebp
    mov ebp, esp
    pushad

    mov ebx, [ebp + 4 * 2]      ; register ， key 的地址放入 eax
    mov ecx, [ebp + 4 * 3]     ; memory ，  bolt 的地址放入 ecx

    lock bts [ecx], 0  ; 把 bolt 的值的第 0 位置为 1，旧值放入 CF     1
    sbb eax, eax            ; 带借位减法，根据 CF 生成 0 或-1          2
    and eax, 1              ; 规范成 0 或 1                           3

    mov [ebx], eax          ; 将旧锁状态写入 register（key）          4

    popad
    pop ebp
    ret
```

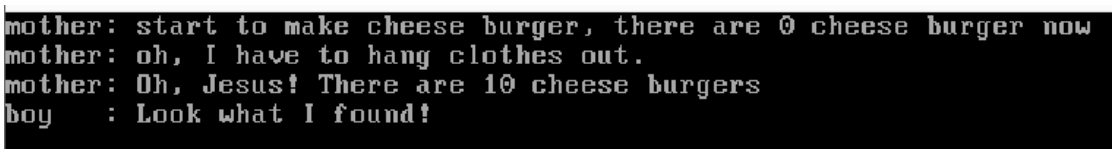
标记 1 命令意思是把 bolt 的值的第 0 位置为 1 ，bolt 的旧值放入 cf 寄存器。标记 2 的命令执行：eax = eax - eax – CF。标记 3 的命令是与操作，eax&1 只保留 eax 的最低位。标记 4 的命令是把 eax 的值写入 register，也就是 key。

当 bolt 为 0x00000001（1）时一直让 bolt 保持为 1（临界区被占用）的状态。旧值 1 放入 CF。此时 eax = eax - eax - 1 = -1。把-1 写入 key。

一旦发现 bolt 为 0x00000000（0）（临界区未被占用），立即将 bolt 置为 1。旧值 0 放入 CF。此时 eax = eax - eax - 0 = 0。把 0 写入 key。

这样可以实现 key 和 bolt 的交换。

实验结果：



和原先的自旋锁实现了一样的功能！

---------- 实验任务 2 ----------

- 任务要求：在本教程的代码环境下创建多个线程来模拟读者写者问题，需要使用读者优先的策略来实现同步，并通过一定的样例设计来体现写者的“饥饿”。
- 思路分析：修改文件 setup.cpp，让儿子作为读者，去读出汉堡的数量；母亲作为写者，制作汉堡修改汉堡的数量。利用多个儿子作为多个读者，使用读者优先策略令汉堡数量一直不变化，体现写者“饥饿”。
- 实验步骤：

1.初始化变量。semaphore 信号量作为读写互斥锁。counter 信号量作为读者间的互斥锁。cheese_burger 为一个共享变量，所有读者可读，只有写者可写。read_counter 记录当前读取 cheese_burger 的读者的数量。

```
Semaphore semaphore; //be a rw_mutex
Semaphore counter;// be a counter
int cheese_burger=0;
int reader_counter=0;
```

2.mother 作为写者。

```
    void a_mother(void *arg) // be a writer
    {
      while(1){

        int delay =0xfffffff;
```

```
        printf("mother %d: try to make cheese burger, there are %d
cheese burger now\n",programManager.running->pid, cheese_burger);

        semaphore.P();
        // make 10 cheese_burger
        cheese_burger += 10;

        printf("mother %d: now I have made %d cheese buger now\n
",programManager.running->pid, cheese_burger);

        while (delay)
            --delay;
        // done

        printf("mother %d: Oh, Jesus! There are %d cheese
burgers\n",programManager.running->pid, cheese_burger);
        semaphore.V();
      }
}
```

为了实现读写互斥，我们需要给“写”的动作上锁。mother 之作汉堡这个行为被我们用读写互斥锁锁住，防止写的时候被读造成读出的错误。

在上锁前先输出 mother try to make burger，体现进程已经被调度运行但是制作汉堡的行为并不会出现。打印这句话后上锁，我们将会发现锁内的内容在读者优先的情况下根本不会执行，体现出写者的“饥饿”。

3.儿子作为写者。

```
    void a_naughty_boy(void *arg) //be a reader
    {
        //读者进入，counter++
      while(1){

        counter.P(); //counter 上锁
        reader_counter++;//读者++
        if(reader_counter==1){
            semaphore.P();
        }//第一个读者上互斥锁阻塞写者进入
        counter.V();

        printf("boy %d : Look what I found! There are %d
burgers!\n",programManager.running->pid,cheese_burger);

        int delay = 0xfffffff;

        while (delay)
            --delay;
        // done

        //读者离开
        counter.P(); //counter 上锁
        reader_counter--;//读者--
```

```
        if(reader_counter==0){

            for(int i=0;i<10000;i++){
                for(int j=0;j<1000;j++){}
        }
            semaphore.V();
        }//没有读者时释放锁让写者进
        counter.V();
        for(int i=0;i<10000;i++){
                for(int j=0;j<1000;j++){}
        }
      }

}
```

读者每一次进入临界区读取共享变量时需要上读者间的互斥锁，目的是保护共享变量 reader_counter。reader_counter 用来记录读者数量，当 reader_counter 为 1 时意味着第一个读者已经进入临界区，这时候我们要锁住读写互斥锁 semaphore 防止写者修改 burger 的数目。而当 reader_counter 为 0 时意味着最后一个读者已经退出临界区，此时没有读者，那么写者就可以进行了。

3.主程序 first_thread。

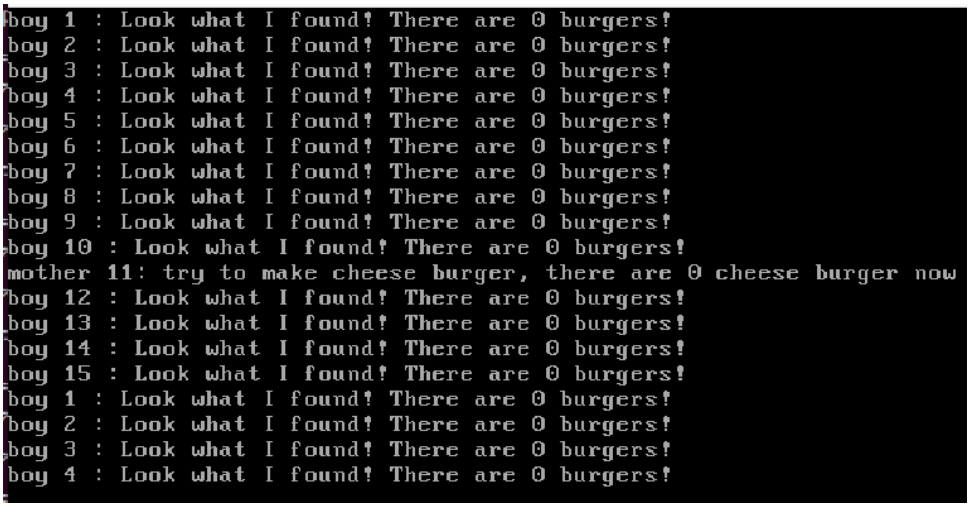
```
    void first_thread(void *arg)
    {
        // 第 1 个线程不可以返回
        stdio.moveCursor(0);
        for (int i = 0; i < 25 * 80; ++i)
        {
            stdio.print(' ');
        }
        stdio.moveCursor(0);

        //cheese_burger = 0;
        semaphore.initialize(1);
        counter.initialize(1);
        for(int i=0; i<10; i++){//十个儿子十个 reader
            programManager.executeThread(a_naughty_boy,      nullptr,
"reader thread", 1);
        }

        programManager.executeThread(a_mother,    nullptr,    "writer
thread", 1);

        for(int i=0; i<4; i++){//再 4 个儿 4 个 reader
            programManager.executeThread(a_naughty_boy,      nullptr,
"reader thread", 1);
        }
        interruptManager.enableTimeInterrupt(); // 开启时钟中断
        interruptManager.enableInterrupt(); // 允许中断发生
```

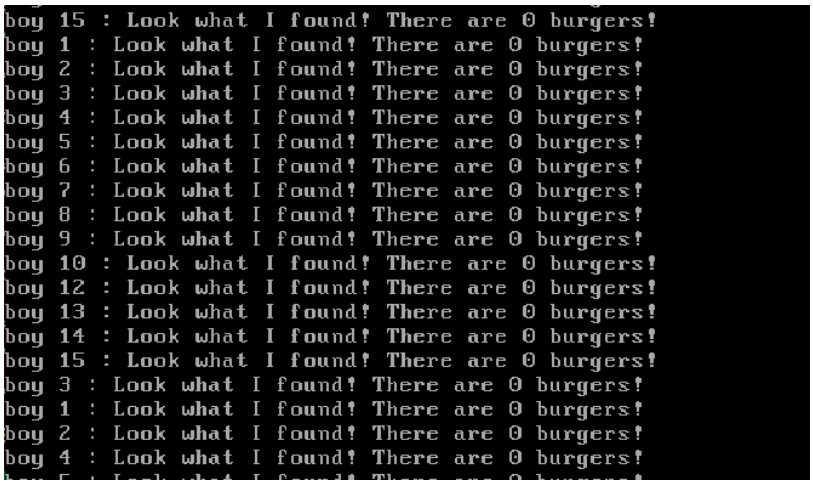
```
        while (true) {
        // 不退出，保持运行状态，让其他线程被调度
        }

}
```

我们在 first_threadzh 中生成读者和写者。先生成 10 个读者，再生成一个写者，最后生成 4 个读者。在 RR 调度算法和所有线程优先级相同的情况下，线程会按顺序循环调度。

按照设想，一群 boy 会按顺序分别来到厨房寻找汉堡并且离开厨房。第一个 boy 进入厨房时会锁住汉堡，目的就是为了保留现场，好让后面的兄弟看看到底有多个汉堡。汉堡一开始是 0 个。第 1 个到第 9 个 boy 进入厨房发现 0 个汉堡。此时 mother 进入厨房 try to make cheese_burger，但是她发现汉堡（假设是做汉堡的工具）被锁住了！她原本计划做 10 个汉堡，但现在根本无法做汉堡了！随后另外 5 个 boy 到达现场，发现汉堡仍然是原先的 0 个！

这意味着作为写者的 mother 被锁阻塞了！在读者优先的情况下 mother 是无法做汉堡的，除非所有的 boy 全部离开厨房，汉堡上的锁才会被最后一个 boy 解除。但是在调度算法之下之前离开的男孩又会重新回到厨房，只要有一个 boy 在检阅汉堡的数量，reader_counter 永远不为 0，mother 就永远无法制作汉堡！mother 感受到了饥饿。



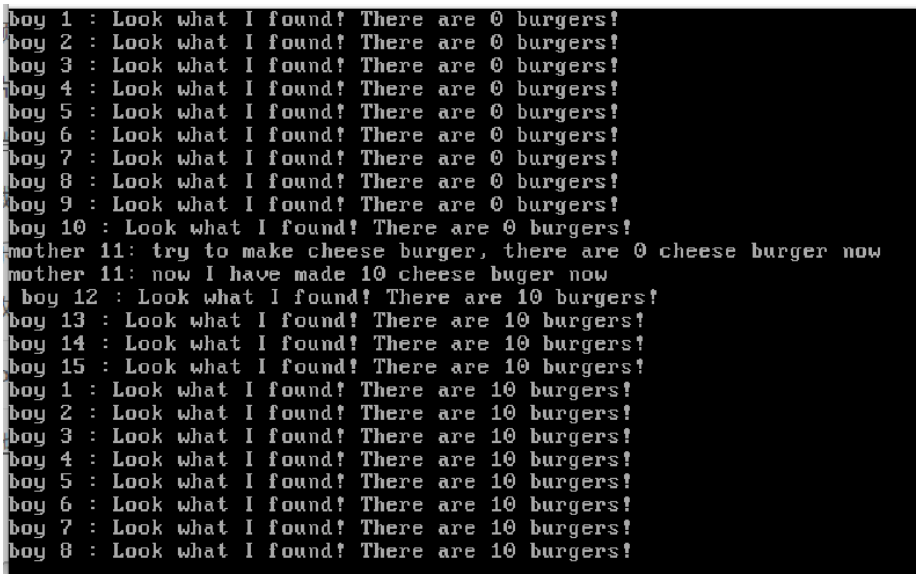


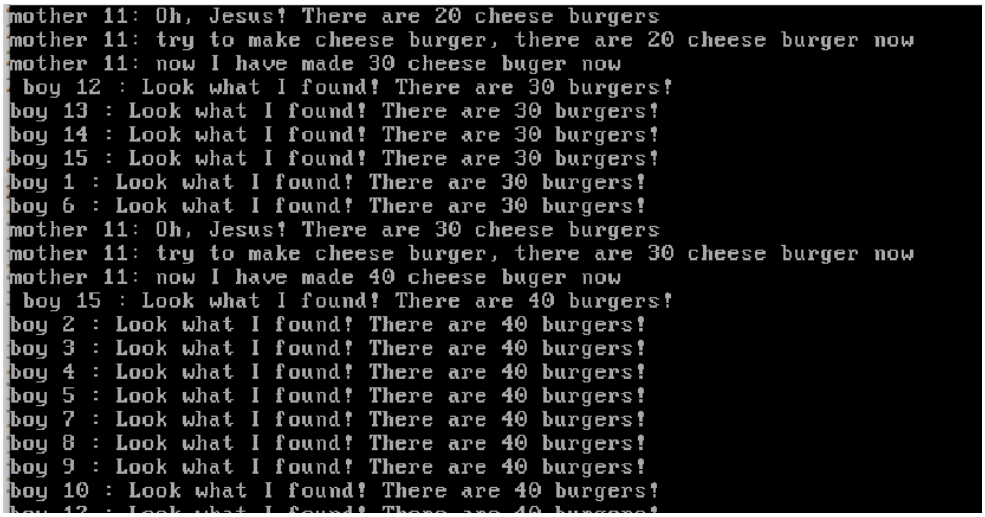
可以在输出中观察到调度器调度 mother 运行了，但是 mother 只做出了试图做汉堡的行动就没有下文了。在之后的循环中，我们可以发现再也没有 pid 为 11 的 mother 出现，说明一直都在读者优先，写者处于饥饿状态。

作为对照，如果我们不上读写互斥锁锁，我们就可以发现 mother 可以正常做汉堡，汉堡的数目是会变化的。

破坏读写互斥锁。把 mother 中上锁的语句注释掉。

```
void a_mother(void *arg) // be a writer
{
  while(1){

    int delay =0xffffffff;

    printf("mother %d: try to make cheese burger, there are %d
cheese burger now\n",programManager.running->pid,
cheese_burger);

    //semaphore.P();
    // make 10 cheese_burger
    cheese_burger += 10;
```





当我们把读写互斥锁破坏掉可以发现，轮到写者运行时写者可以正常对汉堡的数量做出改动，汉堡越来越多了。mother 吃上了汉堡！终于不再被饥饿！

---------- 实验任务 3 ----------

- 任务要求：

  1）在本教程的代码环境下，创建多个线程来模拟哲学家就餐的场景。结合信号量来实现理论课教材中给出的关于哲学家就餐问题的方法。

  2）演示死锁的场景并提出解决死锁的方法。

- 思路分析：本实验通过信号量模拟哲学家就餐问题，初始实现中，每位哲学家按顺序获取左右筷子，可能导致循环等待死锁（五人同时持左筷）。为复

现死锁，在进食阶段加入长延时，使所有哲学家卡在等待右筷状态。解决方案是引入计数信号量（初始值为 4），限制最多四人同时拿筷，打破循环等待条件。该方法确保至少一人能获得双筷进食，避免死锁，同时维持并发性。

- 实验步骤：

1.实现哲学家问题。

1）定义五个信号量作为筷子。

```
Semaphore chopstick[5];
```

2）实现哲学家类。哲学家有自己的序号，有两个动作 thinking 和 eating。

```
class Philosopher{
private:
    int index;
public:
    Philosopher(){}
    Philosopher(int i):index(i){}
    void thinking(){
       printf("philosopher %d: I'm thinking! \n",index);
    }

    void eating(){
        printf("philosopher %d:  I'm eating!  \n",index);
    }
};
```

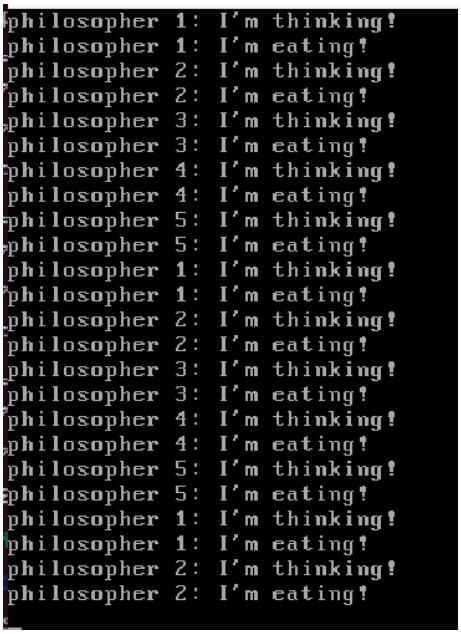
3）建立哲学家进程。哲学家先进行思考，之后先拿起左手的筷子，再拿起右手的筷子，当某个哲学家拿起两只筷子，便开始进食，进入临界区输出“I'm eating! "。随后哲学家先放下左手的筷子，再放下右手的筷子。

```
void philosopher(void * arg){
    int i= count;
    count++;
    while(true){
        Philosopher p=Philosopher(i+1);
        p.thinking();
        chopstick[i].P();//左手拿筷子
        chopstick[(i+1)%5].P();//右手拿筷子
        p.eating();
        chopstick[i].V();
        chopstick[(i+1)%5].V();
        for(int j=0;j<10000;j++){
            for(int k=0;k<20000;k++){
            }
        }
    }
}
```

4）创建进程，开始运行。

```
    void first_thread(void *arg)
    {
        // 第 1 个线程不可以返回
        stdio.moveCursor(0);
        for (int i = 0; i < 25 * 80; ++i)
        {
            stdio.print(' ');
        }
        stdio.moveCursor(0);

        count=0;
        for(int i=0;i<5;i++){
            chopstick[i].initialize(1);
        }

        for(int i=0;i<5;i++){
             programManager.executeThread(philosopher,       nullptr,
"philosopher_thread", 1);
        }

        asm_halt();
    }
```

5）实验结果如下。可以发现 5 个哲学家依次开始思考和吃饭，不断循环，没有出现死锁。



2.制造死锁并找出解决方法。

1）想要制造死锁，可以适当延迟哲学家左右手拿筷子的间隙。我们在哲学家拿起左筷子后加一个延时。

```
while(true){
    Philosopher p=Philosopher(i+1);
    p.thinking();
    chopstick[i].P();
    for(int i=0;i<100000;i++){//导致死锁
        for(int j=0;j<10000;j++){}
    }
    chopstick[(i+1)%5].P();
```

2）加了延时后我们可以发现，所有的哲学家都在思考，但是没有一个哲学家可以吃饭！进程就这样卡住了。这就说明我们的线程出现了死锁。

```
philosopher 1: I'm thinking!
philosopher 2: I'm thinking!
philosopher 3: I'm thinking!
philosopher 4: I'm thinking!
philosopher 5: I'm thinking!
```

3）利用信号量解决死锁。我们可以限制同时进食的人数至多为 4，这样就不会再出现死锁问题。

我们先定义一个信号量 semaphone，用来限制同时进食的人数。我们把 semaphone 初始化为 1，这样就可以保证同时吃饭的哲学家至多为 1 人。

```
Semaphore chopstick[5];
Semaphore semaphore; //!!!!!
int count=0;
```

在 first_thread 中初始化 semaphone 为 1。

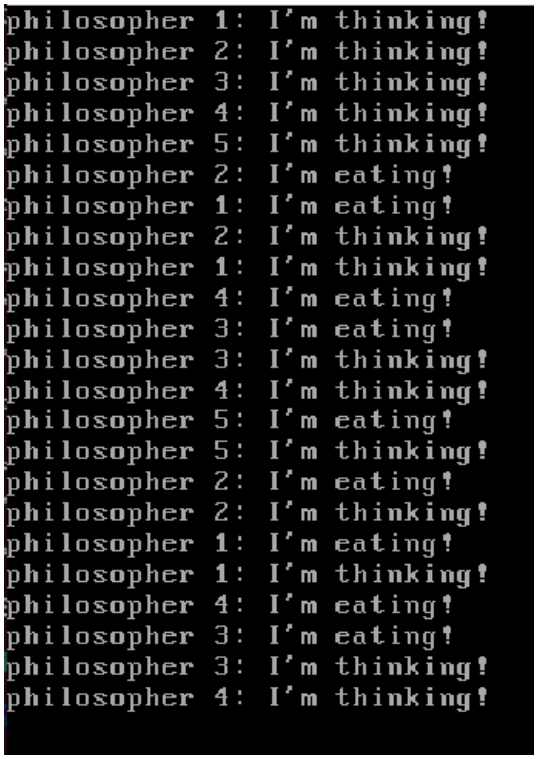
```
stdio.moveCursor(0);
semaphore.initialize(1);///!!!!
count=0;
```

之后我们把 semaphone 这个信号量用来锁住拿筷子、吃饭到放筷子这个过程。

```
void philosopher(void * arg){
    int i= count;
    count++;
    while(true){
        Philosopher p=Philosopher(i+1);
        p.thinking();
        semaphore.P();
        chopstick[i].P();//拿左筷子
        for(int i=0;i<100000;i++){//导致死锁
```

```
                for(int j=0;j<10000;j++){}
            }
            chopstick[(i+1)%5].P();//拿右筷子
            p.eating();
            chopstick[i].V();
            chopstick[(i+1)%5].V();
            semaphore.V();
            for(int j=0;j<10000;j++){
                for(int k=0;k<20000;k++){
                }
            }
        }
}
```

运行程序我们可以发现不会再出现死锁了，虽然会有延迟，但是各个哲学家都可以思考和吃饭。



至此，我们的哲学家问题解决啦！

Section 5 实验总结与心得体会

通过本次实验，我深入理解了操作系统中的并发控制与锁机制。在实现自旋锁和信号量的过程中，我认识到原子操作对保证线程安全的关键作用，尤其是 xchg 和 lock bts 指令在底层实现中的精妙设计。读者-写者问题的实验让我直观体会到调度策略对线程行为的影响，读者优先策略导致的写者饥饿现象让我意识

到公平性的重要性。哲学家就餐问题的死锁复现与解决，让我掌握了资源分配与死锁预防的实际方法。实验中遇到的线程调度、锁竞争等问题，促使我不断调试和优化代码，锻炼了我的系统编程能力。这次实验不仅巩固了课堂理论知识，更让我对操作系统的并发控制有了更深刻的认识，为后续学习打下了坚实基础。

Section 7 附录：参考资料清单

PPT。